بررسی رفتار خزشی خاک رس در شرایط آزمایشگاهی *

علیرضا نگهدار[۱]   شیما یادگاری[۲]   سیاب هوشمندی[۳]

چکیده *مکانیسم‌ها و فاکتورهای تأثیرگذار بر رفتار خزشی خاک‌های رسی به دلیل ساختار پیچیدهٔ این نوع خاک‌ها هنوز به‌درستی شناخته نشده است. در این مقاله به‌منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خزشی خاک‌های رسی ازجمله سطوح تنش، فشار بیش تحکیمی و تأثیر آب‌حفره‌ای، آزمایش‌های تحکیم (ادئومتر) در حالت‌های تک‌مرحله‌ای، چندمرحله‌ای و بارگذاری- باربرداری انجام شده و مکانیسم خزشی با در نظر گرفتن لغزش و تغییر شکل ذرات شرح داده شده است. چون انجام برخی آزمایش‌های خزشی ممکن است ماه‌ها طول بکشد، بنابراین پیش‌بینی روشی جدید برای سرعت بخشیدن به آزمایش اهمیت دارد. نتایج نشان می‌دهند در آزمایش بارگذاری- باربرداری زمان لازم جهت رسیدن به یک تخلخل مشخص طی خزش کمتر از آزمایش تک‌مرحله‌ای می‌باشد و این فرآیند باعث تسریع در خزش می‌شود.*

واژه‌های کلیدی خزش; تحکیم ادئومتر; آزمایش تک‌مرحله‌ای; آزمایش چندمرحله‌ای; آزمایش بارگذاری - باربرداری .

Investigation of Creep Behavior of the Clay Soil in the Laboratory Condition

A. Negahdar   Sh. Yadegari   S. Houshmandi

Abstract *Mechanism and factors influencing on creep behavior of clay soil have not been understood yet due to its complex structure. In this paper, to investigate the affecting parameters on the creep behavior of the clay soils such as stress level, over consolidated pressure and water pressure, odeometr test are performed in states of single stage, stepwise and overloaded-unloaded and the creep mechanism are explained with considering the effect of sliding of clay particles at their contacts and deformation of particles. Since the conducting of some creep tests may last for months, therefore the prediction of a new method to accelerate the creep tests is necessary. The results show that in overloaded-unloaded test, the time required to reach the specified porosity is lower than the single stage, and this process accelerates the creep.*

Keywords Creep, Consolidation Oedometer Test, Multi-Stage Creep Test, Loading and Unloading Test.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۰/۱۳ می‌باشد

(۱) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاهٔ محقق اردبیلی، اردبیل. negahdar@uma.ac.ir

(۲) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاهٔ محقق اردبیلی، اردبیل.

(۳)دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

مقدمه

رفتار تراکم‌پذیری خاک‌ها به نگرانی مهمی در مهندسی ژئوتکنیک تبدیل شده است. با اجرای ساختمان‌ها، خاک‌ریزها و جاده‌ها بر روی خاک‌های رسی، اغلب نشست‌های قابل‌توجهی رخ می‌دهد. این نشست‌ها را مخصوصاً زمانی می‌توان مهم تلقی نمود که فونداسیون سازه متشکل از لایه‌های عمیق رسی باشد. از آنجائی که نشست‌های درازمدت فونداسیون سازه‌ها در اثر خزش اتفاق می‌افتد، محاسبه و پیش‌بینی نشست‌های درازمدت اهمیت زیادی دارد.

زمانی که خاک تحت بارگذاری ثابتی قرار می‌گیرد، تغییرشکل‌هایی را باگذشت زمان تجربه می‌کند که با عنوان تراکم ثانویه و یا خزش شناخته می‌شود. تغییرشکل‌های وابسته به زمان، به‌خصوص زمانی که تغییرشکل‌های درازمدت مطرح می‌شود در مهندسی ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارند. ازجمله این تغییرشکل‌ها به نشست سازه بر روی زمین‌های تراکم پذیر، حرکات شیب‌های طبیعی و یا گودبرداری‌شده، فشرده شدن زمین‌های نرم اطراف تونل و... می‌توان اشاره کرد.

تاریخچه بررسی رفتار خزشی خاک‌های رسی به قرن ۱۹ برمی‌گردد. اولین تحقیقات درزمینهٔ ضریب تراکم ثانویه حدود یک دهه بعد از تئوری ترزاقی در سال ۱۹۲۵ به عمل آمد که بیانگر تراکم خاک‌های رسی در اثر زایل شدن فشار آب حفره‌ای بود، علاوه بر آن مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط Buisman و Taylor به‌طور واضح، تأثیر زمان‌بر تراکم‌پذیری رس را بیان می‌کند. Buisman [1] برای خاک‌های رسی، رابطه نشست–لگاریتم زمان را تحت تنش ثابت به‌صورت خطی بیان نمود. Taylor [2] برای اولین بار مدل وابسته به زمان را به‌منظور تشریح رفتار خزشی خاک‌های رسی، که در آن تحکیم اولیه و تراکم ثانویه به‌عنوان دو فرآیند مجزا در نظر گرفته می‌شوند ارائه نمود. Bjereum به‌منظور تشریح رفتار خزشی و تأثیرات ناشی از فشار بیش تحکیمی، مدلی را که در آن تحکیم اولیه و تراکم ثانویه به‌صورت کوپل رفتار می‌کنند، ارائه نمود. Lambe [3]، خروج و استهلاک مایع منفذی از منافذ ریز را ازجمله دلایل تراکم ثانویه معرفی نمود. Berry[4] و Poskitt، Navarro و Alonso [5] به این نتیجه رسیدند که انتقال آب از منافذ کوچک به بزرگ دلیل تراکم ثانویه می‌باشد و در تنش‌های مؤثر ثابت، طی مرحلهٔ خزشی، متوسط برخورد ذرات بایستی ثابت باشد.

رس شامل ذرات ریز کوچک‌تر از ۲ میکرون می‌باشد که بارهای منفی سطح آن را پوشانده است. به دلیل ماهیت رس، ذرات مستعد فرایندهای فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. در حالت خشک، ذرات رس کاتیون‌ها را جذب کرده و زمانی که در معرض آب قرار می‌گیرد به‌منظور رسیدن به حالت تعادل، کاتیون‌ها از هم جدا می‌شوند. همانند شکل(۲)، بارهای منفی سطح رس و بارهای پراکنده‌شده تشکیل لایه آب مضاعف را می‌دهند[6]. در شرایطی که رس در مجاورت مایع منفذی شامل مولکول‌های قطبی قرار گیرد، منافذ کوچک و بزرگ شکل می‌گیرند. منافذ کوچک ناشی از جذب آب سطحی و منافذ بزرگ براثر آب آزاد تشکیل می‌شوند. مکانیسم درگیر در رفتار خزشی خاک‌های رسی را می‌توان ناشی از لغزش، تماس، تغییر شکل ذرات و تراکم منافذ دانست[7-8]. Griffths and Joshi [9] رنج منافذ درگیر در آزمایش خزشی را با انجام یک سری آزمایش‌های خزشی در سطح میکروسکوپیک بر نمونه‌های رسی کائولونیتی موردبررسی قراردادِند و این محدوده را ۱۰۰۰–۱۰۰ نانومتر بیان کردند نتایج آزمایش Mercury-intrusion porosimetry (MIP) انجام شده توسط Wang[10], بر روی نمونه کائولونیت نشان می‌دهد که طی خزش، تغییرات حجمی در منافذ بزرگ اتفاق می‌افتد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D4284-12 به‌منظور بررسی رفتار خاک در سطح میکروسکوپیک، ازجمله اندازه‌گیری اندازه منافذ، حجم، تخلخل، چگالی و سایر ویژگی‌های مربوط به مصالح

صورت می‌گیرد.

Mitchell [11] و Soga تراکم ثانویه را ناشی از آرایش مجدد ذرات، تماس و لغزش ذرات و خروج مایع منفذی از منافذ ریز تحت تنش‌های ثابت بیان کردند. مکانیسم‌ها و فاکتورهای تأثیرگذار بر تراکم ثانویه، توسط محققان زیادی مورد مطالعه قرارگرفته و اغلب بر این باورند که تغییرشکل‌ها براثر لغزش و آرایش مجدد ذرات در تنش‌های ثابت اتفاق می‌افتد و مکانیسم‌های خزشی ناشی از تغییر شکل، برخورد، لغزش ذرات بر روی‌هم و تراکم منافذ می‌باشد.

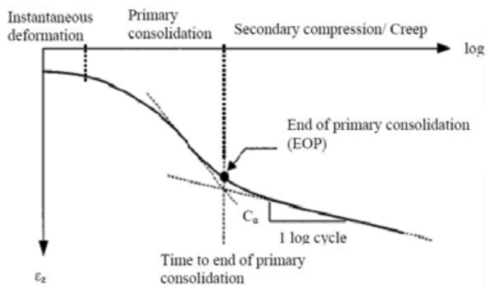
خاک‌های تحت تنش تغییرشکل‌هایی را به‌طور پیوسته در طول مدت‌زمان، تجربه می‌کنند. خزش درواقع به تغییرشکل‌های برشی و یا حجمی وابسته به زمان تحت نیرو یا تنش ثابت اطلاق می‌شود. معمولاً خزش در یک نرخ ثابت و یا متغیر با زمان اتفاق می‌افتد. در مطالعات آزمایشگاهی خزشی، نمونه تا تنش ثابت مشخصی بارگذاری می‌شود و تغییرشکل‌های آن بررسی می‌گردد. ارتباط کرنش متغیر بازمان در آزمایش تحکیم یک‌بعدی در شکل (۱) آورده شده است. مرحلهٔ اول نشان‌دهنده تغییرشکل‌های الاستیک ذرات می‌باشد. مرحلهٔ دوم تحکیم اولیه نام دارد که در آن یک سری تغییرشکل‌ها بر اثر زایل شدن فشار آب حفره‌ای در طول بارگذاری پله‌ای اتفاق می‌افتد، به طوری که سرعت تحکیم اولیه از طریق سرعت خروج آب از درون منافذ خاک کنترل می شود. مرحلهٔ سوم تحکیم ثانویه یا خزش نام دارد که در آن تغییرشکل‌های حجمی تحت یک تنش ثابت اتفاق می‌افتد. سرعت تحکیم ثانویه از طریق مقاومت ویسکوز ساختار خاک کنترل می‌شود. مطابق با شکل (۱)، ارتباط کرنش‌های خزشی و لگاریتم زمان ممکن است خطی، انحنا رو به بالا و یا رو به پایین باشد.

منحنی تحکیم اولیه را می‌توان به‌صورت زیر با رابطه (۱) بیان کرد:

$$e = e_0 - C_c \log \frac{\sigma}{\sigma_0} \qquad (۱)$$

در این رابطه:

e: نسبت تخلخل، e_0: تخلخل اولیه، σ: تنش، σ_0: تنش اولیه (۱ کیلو پاسکال) می‌باشد.



شکل ۱ ارتباط کرنش- زمان در آزمایش تحکیم یک‌بعدی

تغییرشکل‌های خاک در پایان تحکیم اولیه را می‌توان با رابطه (۲) بیان نمود [2].

$$e = e_{EOP} - C_\alpha \log \frac{t}{t_{100}} \qquad (۲)$$

در این رابطه: e نسبت تخلخل، e_{EOP} تخلخل در پایان تحکیم اولیه، t_{100} زمان پایان تحکیم اولیه، C_α ضریب تراکم ثانویه می‌باشد.

ضریب تراکم ثانویه (C_α) پارامتر مهمی برای شرح رفتار خزشی و تراکم ثانویه می‌باشد. این ضریب را به روش‌های مختلفی می‌توان تعیین نمود. معادلهٔ (۳) کاربرد گسترده‌ای دارد[12].

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t} \qquad (۳)$$

در این رابطه Δe تغییرات نسبت تخلخل در طول تحکیم ثانویه، t زمان می‌باشد.

ترکیبات معدنی (مواد معدنی موجود در رس) سطوح تنش، فشار بیش تحکیمی، مایع منفذی، شرایط زهکشی و ساختار خاک به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار خزشی در نظر گرفته می‌شود[13]. اگرچه تأثیر این پارامترها به‌طور کامل مشخص نشده است، بنابراین شناسایی و مطالعه تأثیرات آنها بر رفتار خزشی ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأثیر سطوح تنش، فشار بیش تحکیمی و آب حفره‌ای مورد مطالعه قرارگرفته و مکانیسم خزشی

با در نظر گرفتن لغزش، برخورد و تغییر شکل قائم ذرات، شرح داده شده است.

بررسی‌های آزمایشگاهی

مصالح مورد استفاده در آزمایش. خاک مورد استفاده در این آزمایش رس کائولونیتی می‌باشد. کائولونیت ازجمله خاک‌های رسی معدنی کریستاله می‌باشد که از ورقه‌های آلومینا و سیلیکا تشکیل شده است و ضخامت هر لایهٔ آن حدود ۰/۷۲ نانومتر می‌باشد. ذرات معدنی کائولونیت، سطوح ویژهٔ بزرگی دارند. سطوح ویژهٔ این ذرات حدود ۲۰-۱۰ مترمربع در هر گرم می‌باشد. سطح این ذرات از آنیون می‌باشد. زمانی که در آب غوطه‌ور می‌شوند، یک‌لایهٔ نازک از آب روی سطح آن‌ها به وجود می‌آید که لایه آب مضاعف نامیده می‌شود که ساختار این لایه، رفتار خاک رس را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل (۲) ساختار لایهٔ آب مضاعف را نشان می‌دهد.

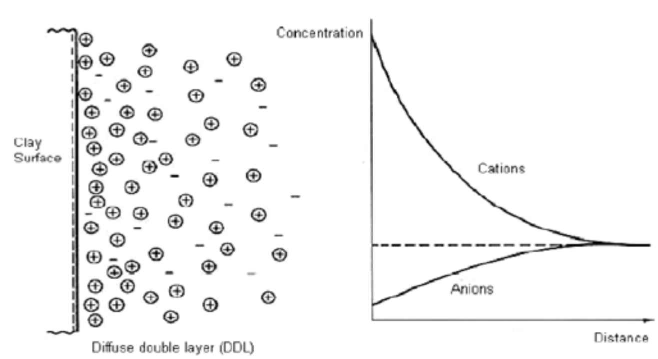
به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه خاک یک سری آزمایش‌های شاخص انجام گرفته شده است. مشخصات خاک رس استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس نمودار حدود اتربرگ، خاک رس در محدوده رس آلی قرار دارد. شکل(۳) منحنی توزیع دانه‌بندی نمونه کائولونیتی را بر اساس استاندارد ASTM D422-63 نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات خاک رس مورد استفاده در آزمایش

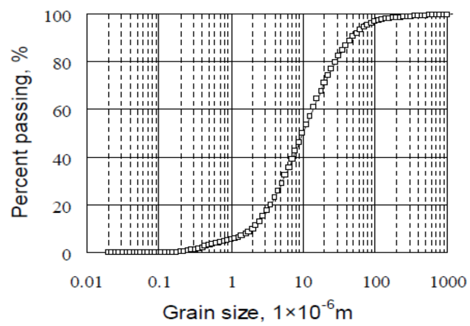
نشانه خمیری (PI)	حد خمیری (PL)	حد روانی (LL)	چگالی نسبی (GS) g/cm^3
۳۳/۳٤	۳۳/٦٦	۵۷	۲/٤۷

روند آزمایش

آزمایش‌ها به‌وسیله دستگاه استاندارد تحکیم یک‌بعدی و تحت کنترل تنش، مطابق با استاندارد ASTM D2435M-11 در حالت‌های تک‌مرحله‌ای، چندمرحله‌ای و بارگذاری-باربرداری بر روی نمونه‌های خشک و اشباع شده با آب انجام شده است. آزمایش در یک تحکیم‌سنج که ادئومتر نامیده می‌شود، انجام شده است. دستگاه تحکیم ادئومتر متشکل از سنگ متخلخل، محفظهٔ تحکیم، صفحهٔ بارگذاری و قالب به قطر ٦ و ارتفاع ۲سانتی‌متر می‌باشد. در این آزمایش زهکشی به‌صورت قائم و یک‌طرفه در نظرگرفته شده است. در نمونه‌های اشباع به‌منظور حفظ شرایط اشباع، داخل محفظه در طول انجام آزمایش با آب پر شده است. دستگاه آزمایش تحکیم در شکل (٤) نشان داده شده است.



شکل۲ لایه آب مضاعف تشکیل‌شده در سطح رس



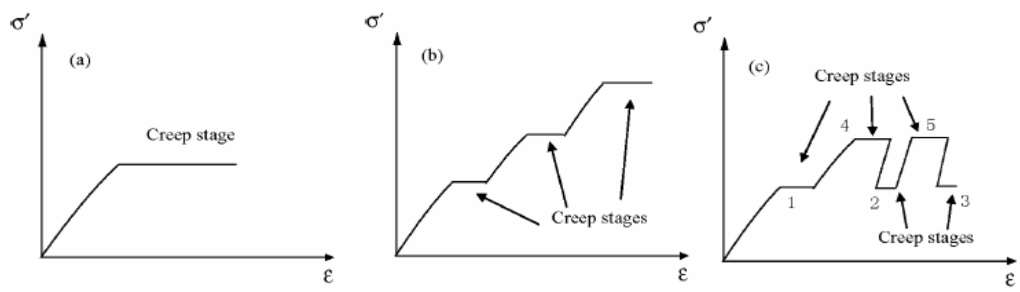
شکل ۳ منحنی دانه‌بندی خاک رس



شکل٤ دستگاه آزمایش تحکیم یک‌بعدی

در آزمایش‌های خزشی فرض بر این است که تغییرشکل‌های خزشی در پایان تحکیم اولیه، زمانی که فشار آب منفذی به‌طور کامل مستهلک شده، شروع می‌شوند. آزمایش‌ها در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است. در نمونه خشک، تنش کل برابر با تنش مؤثر می‌باشد، بنابراین نمونه خشک، رفتار خزشی درستی بعد از اعمال تنش‌های کل از خود نشان می‌دهد ولی در خاک‌های اشباع دقت رفتار خزشی وابسته به نحوه بارگذاری دارد، به‌طوری‌که با کنترل بار، خاک‌های اشباع بعد از زایل شدن فشار آب حفره‌ای، رفتار خزشی درستی از خود نشان می‌دهند. بنابراین زمان لازم جهت زایل شدن فشار آب منفذی برای خاک‌های اشباع t_{100} در نظر گرفته شده است[14].

در شکل(۵) نحوه انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است. در حالت تک مرحله‌ای نمونه خاک تا تنش مؤثر مشخصی بارگذاری می‌شود و در همان سطح از تنش، رفتار خزشی بررسی می‌شود (single-stage). در حالت چندمرحله‌ای نمونه تحت تنش‌های مؤثر متفاوتی از مقدار کم تا زیاد، قرار (step-wise). در حالت بارگذاری-باربرداری، نمونه خاک تا تنش بیش تحکیمی ($\sigma_{overloaded}$) بارگذاری شده و اجازه داده می‌شود که تحت این تنش تحکیم پیدا کند، سپس نمونه تا تنش خزشی موردنظر باربرداری شده و تحت بررسی قرار می‌گیرد (overloaded-unloaded) [۱۵].



شکل ٥- مراحل انجام آزمایش (a) تک مرحله‌ای، (b) چند مرحله‌ای، (c) بارگذاری-باربرداری

مراحل انجام آزمایش. هدف از این مطالعه، بیان تأثیر سطوح تنش و فشار بیش تحکیمی و تأثیر آب حفره‌ای بر رفتار خزشی خاک‌های رسی می‌باشد. آزمایش خزشی تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای بر نمونه‌های کائولونیتی خشک‌شده در هوا و اشباع‌شده با آب به‌منظور بررسی تأثیر سطوح تنش و آب منفذی و آزمایش بارگذاری - باربرداری به‌منظور بررسی تأثیر فشار بیش تحکیمی بر رفتار خزشی انجام گرفته است. بارگذاری براساس استاندارد (ASTM D2435M–11)، به‌صورت پله‌ای در محدودهٔ (۸۰-۰) کیلو پاسکال بافاصله زمانی ۲۰ دقیقه به‌منظور استهلاک کامل فشار آب حفره‌ای اضافی اعمال می‌شود[16]. این مدت زمان اعمال بار، براساس نتایج آزمایش تحکیم یک‌بعدی انجام شده بر روی نمونه‌های کائولونیتی اشباع‌شده با آب، انتخاب شده است. مطابق با منحنی کاساگرانده، نمونه رس کائولونیتی با ضخامت ۲۰ میلی‌متری به‌منظور کامل شدن تحکیم اولیه تحت شرایط زهکشی قائم، به ۲۰ دقیقه زمان نیاز دارد.

آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌ای بر روی نمونه‌های کائولونیتی خشک و اشباع در تنش ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال انجام شده است. نمونه‌های اشباع به مدت ۲۰ روز و نمونه‌های خشک به مدت ۵ روز تحت تنش قرار گرفته است.

آزمایش خزشی چندمرحله‌ای در حالت خشک و اشباع با اعمال تنش‌های ۵۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ کیلو پاسکال به فاصلهٔ زمانی ۵ روز، انجام شده است.

در آزمایش خزشی بارگذاری - باربرداری ابتدا نمونه‌ها در تنش‌های ۲۲۵ و ۵۲۵ کیلوپاسکال بارگذاری می‌شوند و به‌مدت ۲۰ دقیقه اجازه داده می‌شود که تحکیم پیدا کنند. بلافاصله بعد از پایان تحکیم اولیه، تا تنش خزشی۲۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال باربرداری شده و به هر نمونه اجازه داده می‌شود که به‌مدت ۵ روز در همین سطح از تنش تحت خزش قرار گیرد. سپس نمونه‌ها تا تنش‌های ۲۵۰ و۵۵۰ کیلو پاسکال بارگذاری شده و پس از ۲۰ دقیقه تحکیم اولیه، تا تنش‌های ۲۰۰ و۵۰۰ کیلو پاسکال باربرداری شده و به مدت ۵ روز رفتار خزشی آن‌ها بررسی می‌شوند. بارگذاری از تنش ۰ تا ۲۲۵ و ۵۲۵ کیلو پاسکال به‌صورت پله‌ای به‌منظور استهلاک کامل فشار آب حفره‌ای اضافی، اعمال می‌شود.

در آغاز هر آزمایش، نسبت تخلخل نمونه‌های کائولونیتی با خشک‌کردن نمونه در گرم‌خانه با دمای ۱۰۰ سانتی‌گراد به‌مدت ۲٤ ساعت و با تعیین درصد رطوبت، به دست می‌آیند. تغییر شکل‌های محوری ناشی از تحکیم اولیه و خزش با استفاده از گیج با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر ثبت می‌شوند. نتایج آزمایش‌ها بر اساس

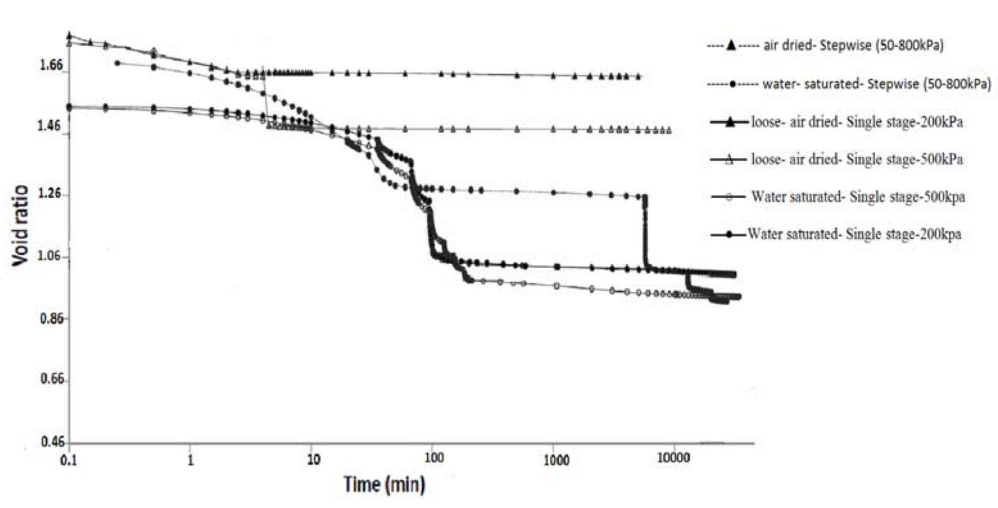
ارتباط شاخص تراکم ثانویه و تخلخل شرح داده شده است.

ارائه و تفسیر نتایج

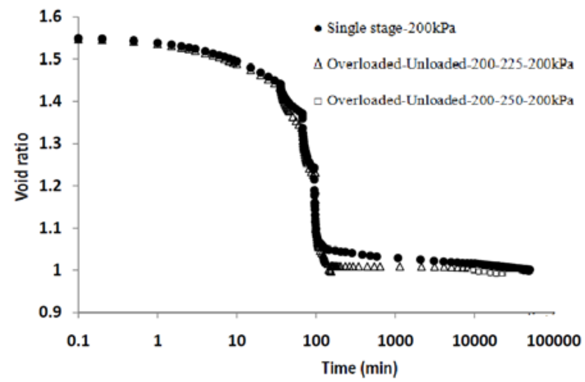
در این تحقیق، رفتار خزشی خاک رسی با استفاده از ضریب تراکم ثانویه (C_α) در آزمایش تحکیم یک‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. از منحنی کاساگرانده به‌منظور تعیین زمان موردنیاز به‌منظور کامل شدن تحکیم اولیه (t_{100})، ضریب تراکم ثانویه (C_α) و تخلخل در پایان تحکیم اولیه (e_{EOP}) استفاده شده است. آزمایش تحکیم در حالت‌های تک‌مرحله‌ای، چندمرحله‌ای و بارگذاری – باربرداری بر روی نمونه‌های خاک رس انجام شده است. تأثیر سطوح تنش، فشار بیش تحکیمی و آب حفره‌ای بر تغییرشکل‌های خزشی مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

شکل (٦) ارتباط نسبت تخلخل با زمان را در آزمایش‌های تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای بر روی نمونه‌های رسی نشان می‌دهد. در شکل بارگذاری پله‌ای، مراحل تحکیم اولیه و تراکم ثانویه نشان داده شده است.

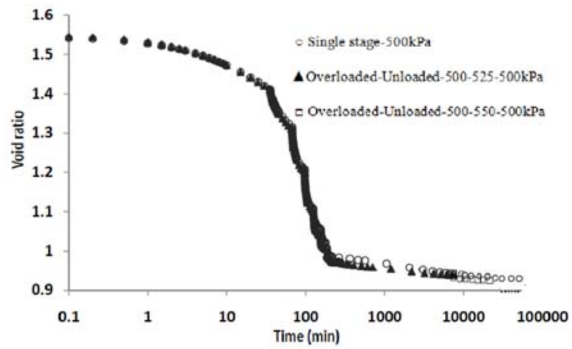
همچنین در آزمایش خزشی بارگذاری – باربرداری ارتباط نسبت تخلخل با زمان‌بر روی نمونه‌های کائولونیتی اشباع‌شده با آب در تنش‌های ۲۰۰ و ۵۰۰ کیلو پاسکال در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. در آزمایش خزشی تک‌مرحله‌ای زمان زیادی برای رسیدن به یک تخلخل معین در طول خزش لازم است درحالی‌که در آزمایش بارگذاری - باربرداری رسیدن به همان نسبت تخلخل زمان کوتاه‌تری لازم دارد. در این آزمایش، با اعمال تنش‌های بیش تحکیمی، لغزش، برخورد ذرات و تراکم منافذ کوچک، با زایل شدن فشار آب حفره‌ای اتفاق می‌افتد. بلافاصله پس از زایل شدن کامل فشار آب حفره‌ای، با باربرداری و اعمال تنش خزشی σ_{creep}، آرایش مجدد ذرات در آن‌ها رخ می‌دهد. درحالی‌که در فرآیند خزش، لغزش و آرایش مجدد ذرات در مدت‌زمان طولانی اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که این آزمایش در پیش‌بینی سریع تغییرشکل‌های خزشی مؤثر است.



شکل ٦ ارتباط نسبت تخلخل– زمان در نمونه رس کائولونیتی در آزمایش تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای در تنش‌های ۵۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۸۰۰ کیلو پاسکال



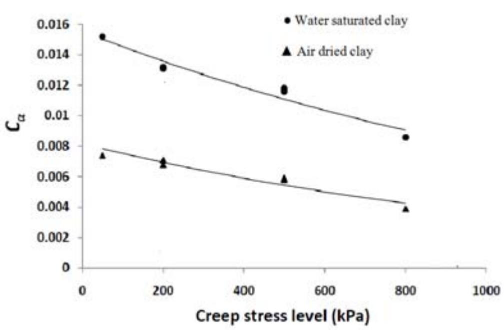
شکل۷ نمودار تخلخل-لگاریتم زمان آزمایش خزشی تک‌مرحله‌ای و بارگذاری-باربرداری
بر نمونه‌های کائولونیتی اشباع در تنش ۲۰۰ کیلو پاسکال



شکل۸ نمودار تخلخل-لگاریتم زمان آزمایش خزشی تک‌مرحله‌ای و بارگذاری-باربرداری
بر نمونه‌های کائولونیتی اشباع در تنش ۵۰۰ کیلو پاسکال

ارتباط بین ضریب تراکم ثانویه (C_α) و تنش خزشی نمونه‌های کائولونیتی به دست آمده از آزمایش تک مرحله ای و چندمرحله ای در شکل (۹) آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که یک ارتباط تقریباً خطی بین ضریب تراکم ثانویه و تنش خزشی وجود دارد. مقادیر (C_α) با افزایش تنش خزشی کاهش می‌یابد.

در نمونه‌های اشباع به‌دلیل توانایی لغزش بالا و اصطکاک پایین، ذرات به‌آسانی بر روی‌هم می‌لغزند، بنابراین با افزایش تنش خزشی و برخورد ذرات، نمونه متراکم‌تر و میانگین نیروهای داخلی کوچک‌تر می‌شود. بنابراین ساختار خاک پایدارتر و تغییرشکل‌های خزشی کمتری در سطوح تنش‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. مقادیر ضریب تراکم ثانویه رس‌های کائولونیتی در تنش‌های مختلف در جدول (۲) آمده است.



شکل۹ ارتباط بین ضریب تراکم ثانویه و تنش خزشی نمونه‌های کائولونیتی به‌دست‌آمده از آزمایش تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای

در آزمایش‌های خزشی، لغزش و جهت‌گیری ذرات در طول آزمایش ساختار اولیه خاک را تغییر می‌دهد. تخلخل اولیهٔ نمونه (e_0) در تنش ۱ کیلو پاسکال و تخلخل در پایان تحکیم اولیه (e_{EOP}) برای نمونه‌های

خشک‌شده در هوا و اشباع‌شده با آب در جدول (۲) آورده شده است. تخلخل اولیه وابسته به ویژگی‌های مایع منفذی و نمونه خاک در مرحلهٔ آماده‌سازی نمونه‌ها می‌باشد. از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر تخلخل در پایان تحکیم اولیه، تماس ذرات، ویژگی‌های سطحی و تأثیر لایهٔ آب مضاعف بر سطح رس می‌باشد. علاوه بر این نسبت منافذ کوچک به منافذ بزرگ به ویژگی‌های مایع منفذی نیز بستگی دارد (برای مثال حجم منافذ کوچک در نمونه‌های قرارگرفته در مایع منفذی قطبی بزرگ‌تر از مایع منفذی غیر قطبی می‌باشد)[17]. تحت تأثیر مایع منفذی ویژگی‌های سطحی ذرات تغییر پیدا می‌کند به‌طوری‌که تخلخل در پایان تحکیم اولیه کاهش پیدا می‌کند. در نمونه‌های خشک‌شده در هوا نسبت منافذ کوچک به بزرگ قابل صرف‌نظر می‌باشد. در نمونه‌های اشباع‌شده، آب به دلیل دارا بودن مولکول‌های قطبی باعث ایجاد لایهٔ آب مضاعف در ساختار رس را می‌شود. اگرچه لایهٔ آب مضاعف باعث ایجاد تورم در نمونه‌های اشباع‌شده می‌شود، اما نسبت تخلخل پایینی در مقایسه با نمونه‌های خشک دارد.

جدول۲ نتایج آزمایش‌های خزشی انجام‌شده بر نمونه‌های رسی

نوع آزمایش	نوع مایع منفذی	نمونه	تنش (کیلو پاسکال)	مراحل بارگذاری	مدت اعمال بار(روز)	e_0	e_{EOP}	C_α
Single stage	Water	SS-WS-۲۰۰	۲۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰	۲۰	۱/۵۵۱	۱/۰۶۱	۰/۰۱۳۱
		SS-WS-۵۰۰	۵۰۰	-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۵۰۰ ۳۰	۲۰	۱/۵۵۳	۰/۹۸۳	۰/۰۱۱۶
	Dry air	SS-AD Loose-۲۰۰	۲۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۲۰۰	۵	۱/۷۸۲	۱/۶۵۹	۰/۰۰۶۸
		SS-AD Loose-۵۰۰	۵۰۰	-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۵۰۰ ۳۰	۵	۱/۷۸۵	۱/۴۸۸	۰/۰۰۵۹
Stepwise	Water	SW-WS-۵۰-۸۰۰	۵۰	۳۰-۵۰	۵	۱/۷۸۱	۱/۲۹۹	۰/۰۱۵۲
			۲۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰	۵		۱/۰۵۸	۰/۰۱۳۲
			۵۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰-creep-۵۰۰	۵		۰/۹۸۷	۰/۰۱۱۸
			۸۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰-creep-۵۰۰-creep-۸۰۰	۵		۰/۹۴۱	۰/۰۰۸۶
	Dry air	SW-AD--۵۰-۸۰۰	۵۰	۳۰-۵۰	۵	۱/۷۷۲	۱/۷۴۵	۰/۰۰۷۴
			۲۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰	۵		۱/۶۵۸	۰/۰۰۷۱
			۵۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰-creep-۵۰۰	۵		۱/۴۸۸	۰/۰۰۵۸
			۸۰۰	۳۰-۵۰-creep-۲۰۰-creep-۵۰۰-creep-۸۰۰	۵		۱/۳۷۱	۰/۰۰۳۹
Overloaded _ Unloaded	Water	O-U-WS-۲۰۰	۲۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۲۲۵-۲۰۰	۵	۱/۵۵۱	۱/۰۱۰	۰/۰۱۳۲
			۲۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۲۲۵-۲۰۰-creep-۲۵۰-۲۰۰	۵		۱/۰۰۴	۰/۰۱۳۱
		O-U-WS-۵۰۰	۵۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۵۰۰-۵۲۵-۵۰۰	۵	۱/۵۵۱	۰/۹۷۲	۰/۰۱۱۴
			۵۰۰	۳۰-۵۰-۸۰-۱۰۰-۲۰۰-۵۰۰-۵۲۵-۵۰۰-creep-۵۵۰-۵۰۰	۵		۰/۹۳۶	۰/۰۱۱۴

SS : Single-Stage WS: Water saturated e_{EOP}: void ratio in end of primary consolidation
SW: Stepwise AD: Dried in Air
O-U: Overloaded-Unloaded e_0 : initial void ratio

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌ای، چندمرحله‌ای و بارگذاری-باربرداری، در سطوح تنشی متفاوت در حالت خشک و اشباع به‌منظور بررسی تأثیر سطوح تنش، فشار بیش تحکیمی و تأثیر آب منفذی بر رفتار خزشی نمونهٔ خاک رس کائولونیتی انجام‌شده و نتایج به‌دست‌آمده بر اساس ضریب تراکم ثانویه C_α شرح داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهند:

با افزایش تنش (σ_{creep}) مقدار C_α کاهش می‌یابد چراکه برخورد و تماس ذرات باهم افزایش می‌یابد، نمونه متراکم‌تر و میانگین نیروهای داخلی کوچک‌تر می‌شود و ساختار رس پایدارتر و تغییرشکل‌های خزشی کمتری در سطوح تنش‌های بالاتر اتفاق می‌افتد.

در تنش‌های یکسان، مقادیر ضریب تراکم ثانویه در آزمایش‌های خزشی تک‌مرحله‌ای و بارگذاری-باربرداری تقریباً یکسان می‌باشد، اما در آزمایش بارگذاری-باربرداری زمان رسیدن به یک تخلخل مشخص کوتاه‌تر از آزمایش تک‌مرحله‌ای است و این آزمایش می‌تواند باعث تسریع در خزش شود. در آزمایش بارگذاری-باربرداری با اعمال تنش‌های بیش تحکیمی و تنش‌های خزشی، آرایش و لغزش مجدد ذرات رخ می‌دهد که باعث افزایش سرعت خزش می‌شود.

از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر تخلخل در پایان تحکیم اولیه، تماس ذرات، ویژگی‌های سطحی و تأثیر لایهٔ آب مضاعف بر سطح رس می‌باشند. آب حفره‌ای بر ساختار اولیه، نسبت منافذ کوچک به بزرگ، تراکم‌پذیری و ضریب تراکم ثانویه تأثیر می‌گذارد به‌طوری‌که تخلخل در پایان تحکیم اولیه کاهش می‌یابد. در حالت خشک تغییرشکل‌ها طی تراکم ثانویه، حتی در تخلخل‌های بالای ناشی از برخورد ذرات خیلی کوچک می‌باشد ولی در حالت اشباع تغییرشکل‌ها و لغزش ذرات رس با تغییر ویژگی‌های سطحی ذرات رس افزایش می‌یابد.

مراجع

1. Buisman, A. S. K. "Results of Long Duration Settlement Tests. Proceedings", *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Harvard University*, Massachusetts, USA, Vol. 1, pp. 103-106, (1936).
2. Taylor, D. W., "Research on Consolidation of Clays". Report serial No. 82, Department of Civil Engineering, *MIT, Cambridge*, Massachusetts, (1942).
3. Lambe, T. W. "The structure of compacted clay". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 82, No. SM2, pp. 1-34, (1958).
4. Berry, P. L and Poskitt, T. J. "The Consolidation of Peat". *Geotechnique*, Vol. 22, No. 1, pp. 27-52, (1972).
5. Navarro, V. and Alonso, E. E., "Secondary Compression of Clays as a Local Dehydration Process". *Geotechnique*, Vol. 5, No. 10, pp. 859-869, (2001).
6. Mitchell, J. K and Soga, K., "Fundamental of soil behavior", 3rd ed., John Wiley and Sons, New Jersey, (2005).
7. Harvey, E. W. "Analysis of Primary and Secondary Consolidation". *Journal of Soil Mechanics and*

Foundation Division, ASCE, Vol. 88, No. SM6, Proc. pp. 207-231, (1962).

8. Sridharan, A. and Jayadeva, M. S. "Double Layer Theory and Compressibility of Clays"., *Geotechnique*, Vol. 32, No. 2, pp. 133-144, (1982).
9. Griffiths, J. F. and Joshi, R. C. "Change in Pore Size Distribution Owing to secondary consolidation of clays". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, No. 1, pp. 20- 24, (1991).
10. Wang, Y. H. and Xu, D. "Dual porosity and secondary consolidation". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 7, pp. 793-801, (2007).
11. Mitchell, J. K and Soga, K. Fundamental of soil behaviour, 3rd ed., John Wiley and Sons, New Jersey, (2005).
12. Mesri, G. "Coefficient of secondary compression". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 99, No. SM1, Proc. Paper 9515, pp. 123-137, (2005).
13. Zhang,Y. Xue, Y. Q., Wu, J. C., and Shi, X. Q. "Creep model of saturated sands in oedometer tests". Geotechnical Special Publication, (2006)..
14. Wang, Z. "Soil creep behavior—laboratory testing and numerical modeling", University of Calgary, PhD Thesis. Calgary, (2010).

۱۵. محمدکاظم جعفری، همایون صنیعی و مجتبی حیدری، مطالعه آزمایشگاهی خواص تراکم پدیری خاک‌های رسی-سیلتی تهران- مجله علوم دانشگاه تهران- جلد بیست و هفتم، شماره ۱ (۵۳-٦٦)، (۱۳۸۰).

16. "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading". Designation: D2435/D2435M – 11.
17. Madhav, M. R. and Sridharan, A. Discussion of., "Analysis of primary and secondary consolidation". *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 89, No. SM4, pp. 233-236, (1963).